



Spatio-Temporal Analysis of Earthquake Occurrences in Iran (1996–2024): A Vulnerability Assessment with a Focus on Urban Areas

Roya Moghabeli ¹, Faezeh Bahadori ², Alireza Mohammadi ^{3*}

^{1&2}Ph.D. Student, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Professor, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 28 March 2025

Revised: 28 July 2025

Accepted: 29 July 2025

Available Online: 31 July 2025

Keywords:

Earthquake Hazard
Assessment

Seismic Vulnerability

Spatial Analysis

GIS

Earthquake Clustering

ABSTRACT

Earthquakes are among the most destructive natural hazards worldwide, causing extensive damage to human societies each year. Spatial and temporal analysis of this phenomenon plays a key role in identifying high-risk areas and guiding crisis management strategies. Due to its location on the active Alpine-Himalayan seismic belt, Iran is one of the most earthquake-prone countries in the world, with over 1,150 fatal earthquakes recorded in the past century. This study aimed to identify the spatial and temporal patterns of earthquakes in Iran from 1996 to 2024 using data from more than 10,000 seismic events ($M \geq 4$), analyzed using GIS tools. Methods employed included Kernel Density Estimation, Getis-Ord G_i^* hot spot analysis, and Local Moran's I index. Results revealed that the highest concentrations and clustering of earthquakes were observed in the western and southwestern regions, especially along the Zagros and Alborz faults. Furthermore, 59% of Iranian cities lie within 14 km of earthquake epicenters, with cities such as Zarand, Khormuj, and Kazeroon facing very high seismic risk. The study's innovation lies in its nationwide scale and the integration of extensive datasets with advanced spatial models. The findings provide critical insights to support urban retrofitting, disaster risk reduction policies, and enhanced resilience in earthquake-prone areas.

* Corresponding author: Dr. Alireza Mohammadi

E-mail address: a.mohammadi@uma.ac.ir

How to cite this article: Moghabeli, R., Bahadori, F., & Mohammadi, A. R. (2025). Spatio-Temporal Analysis of Earthquake Occurrences in Iran (1996–2024): A Vulnerability Assessment with a Focus on Urban Areas. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 166-189. <https://doi.org/10.22067/geoe.2025.92804.1562>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Earthquakes are among the most devastating natural disasters, causing significant human and financial losses worldwide. Iran, located in the seismically active Alpine-Himalayan belt, has experienced numerous destructive earthquakes due to its complex tectonic structure. The country's vulnerability to earthquakes is further exacerbated by rapid urbanization, poor building standards, and a high concentration of population in high-risk areas.

Since 1996, more than 10,000 earthquakes (magnitude ≥ 4.0) have been recorded in Iran, with a significant portion occurring in the Zagros, Alborz, and eastern regions. The spatial and temporal analysis of earthquakes is essential for understanding their patterns and developing effective risk reduction strategies. Despite extensive studies on earthquake hazards, comprehensive research integrating spatial and temporal trends at a national scale remains scarce. This study seeks to address this gap by analyzing the spatial distribution and temporal occurrence of earthquakes in Iran from 1996 to 2024.

The key objectives of this research include:

- Identifying high-risk seismic zones based on historical earthquake data.
- Analyzing the relationship between seismic events and active fault lines.
- Assessing the vulnerability of urban areas to earthquake hazards.
- Providing insights for earthquake risk mitigation and urban planning policies.

Using GIS-based spatial analysis methods, this study evaluates earthquake clusters, density patterns, and their correlation with urban centers and fault zones. The findings contribute to a better understanding of seismic hazards in Iran and offer valuable recommendations for improving disaster preparedness and resilience in urban areas.

Material and Methods

Earthquakes are among the most devastating natural disasters, causing significant human and financial losses. Iran, located in the Alpine-Himalayan belt, has experienced frequent seismic activity due to its complex tectonic structure. Since 1996, more than 10,000 earthquakes (magnitude ≥ 4.0) have been recorded, mostly in the Zagros, Alborz, and eastern regions. Rapid urbanization, poor building standards, and dense populations in high-risk areas exacerbate the vulnerability. This study analyzes the spatial and temporal distribution of earthquakes in Iran (1996–2024) to identify high-risk zones, assess urban vulnerability, and provide insights for risk mitigation. Using GIS-based methods, we evaluate earthquake clusters, density patterns, and their correlation with fault zones.

This research adopts a quantitative approach using spatial analysis techniques. Earthquake data (magnitude ≥ 4.0) were obtained from the Iranian Seismological Center and processed in ArcGIS. Fault line maps and urban population data were integrated into a GIS framework. Spatial methods such as Kernel Density Estimation (KDE) identified high-risk zones, Getis-Ord G_i^* detected seismic clusters, and Buffer Analysis assessed city proximity to faults. Moran's I measured clustering patterns. The results highlight seismic hazard variations and provide guidance for urban planning strategies to enhance disaster resilience.

Results and Discussion

The results indicate that seismic activity is highly concentrated in western, northwestern, and southwestern Iran, particularly along the Zagros and Alborz fault lines. Kernel Density Estimation (KDE) revealed that the highest earthquake densities occur in the provinces of Hormozgan, Kerman, Fars, and Bushehr. Getis-Ord G_i^* analysis identified significant seismic hot spots in these regions, confirming their high-risk status. Buffer Analysis showed that nearly 59% of major Iranian cities are within 40 km of an earthquake epicenter, with cities like Zarand, Khormuj, Ravar, and Kazeroun being particularly vulnerable. Additionally, 73% of recorded earthquakes occurred at depths of less than 15 km, increasing the likelihood of severe damage in urban areas.

The findings align with previous studies, which highlight the active seismicity of western and southern Iran due to major fault systems. However, some discrepancies were observed, such as the lower-than-expected earthquake density in northeastern Iran, possibly due to variations in data collection periods and methodologies. These results emphasize the urgent need for stricter construction regulations, seismic hazard zoning, and the integration of GIS-based monitoring systems to enhance disaster preparedness and resilience.

Future research should incorporate geotechnical factors, historical seismic patterns, and predictive modeling using artificial intelligence for improved risk assessment and mitigation strategies.

Conclusion

This study analyzed the spatial and temporal distribution of earthquakes in Iran from 1996 to 2024 (Gregorian calendar) to identify high-risk zones and assess urban vulnerability. The findings revealed that seismic activity is concentrated in western, northwestern, and southwestern regions, particularly along the Zagros and Alborz fault lines. Approximately 59% of major Iranian cities are within 40 km of an earthquake epicenter, increasing their risk of damage. Additionally, the majority of earthquakes occurred at shallow depths, further intensifying their impact on urban areas.

The results underscore the necessity for stricter construction regulations, enhanced seismic hazard zoning, and the integration of GIS-based monitoring systems to improve disaster preparedness. Implementing early warning systems, strengthening infrastructure, and promoting public awareness campaigns are crucial steps toward reducing earthquake risks.

Future research should focus on incorporating geotechnical assessments, historical seismic trends, and predictive modeling using artificial intelligence to enhance earthquake hazard mitigation strategies. By adopting a data-driven approach, policymakers and urban planners can develop more effective disaster risk management plans, ultimately increasing the resilience of Iranian cities against seismic hazards.



تحلیل فضایی- زمانی رخداد زلزله در ایران (۱۳۷۵-۱۴۰۳):

یک مطالعه آسیب شناسانه با نگاهی به شهرها

رؤیا مقابلی^۱،  فائزه بهادری^۲،  علیرضا محمدی^{۳*}

^{۱،۲} دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^{۳*} استاد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
زلزله یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی در جهان است که سالانه خسارات گسترده‌ای به جوامع انسانی وارد می‌کند. تحلیل فضایی و زمانی این پدیده می‌تواند نقش مؤثری در شناسایی نواحی پرخطر و مدیریت بحران ایفا کند. ایران به دلیل قرارگیری در کمربند فعال لرزه‌ای آلپ - هیمالیا، یکی از زلزله‌خیزترین کشورهای جهان است و طی یک قرن گذشته بیش از ۱۱۵۰ زلزله مرگبار در آن به ثبت رسیده است. پژوهش حاضر با هدف شناسایی الگوهای مکانی و زمانی زمین‌لرزه‌ها در ایران طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳، از داده‌های بیش از ۱۰,۰۰۰ زمین‌لرزه با بزرگای ۴ و بالاتر و ابزارهای GIS بهره گرفته است. ابزارهای تحلیلی شامل تخمین تراکم کرنل، تحلیل لکه‌های داغ *Getis-Ord Gi و شاخص موران محلی بوده‌اند. نتایج نشان داد که بیشترین تراکم و خوشه‌بندی زلزله‌ها در غرب و جنوب‌غربی ایران و در امتداد گسل‌های زاگرس و البرز متمرکز است. همچنین، ۵۹٪ از شهرهای کشور در فاصله کمتر از ۱۴ کیلومتری از کانون‌های زلزله قرار دارند و شهرهایی مانند زرنند، خورموج و کازرون در معرض خطر بسیار بالا قرار دارند. نوآوری پژوهش در تحلیل ملی و ترکیب داده‌های گسترده با مدل‌های پیشرفته مکانی است. یافته‌ها می‌توانند در مقاوم‌سازی شهری، سیاست‌گذاری مدیریت بحران و ارتقای تاب‌آوری مناطق زلزله‌خیز به کار گرفته شوند.	تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷
	کلمات کلیدی: ارزیابی خطر زلزله آسیب‌پذیری لرزه‌ای تحلیل فضایی GIS خوشه‌بندی زلزله

مقدمه

تاریخ زمین‌شناسی بشر نشان می‌دهد که انسان همواره با مخاطرات طبیعی مانند زلزله، سیل و طوفان مواجه بوده است. در این میان، زلزله به‌عنوان پدیده‌ای غیرقابل پیشگیری، تکرارپذیر و ناگهانی، همواره یکی از تهدیدهای جدی برای جوامع انسانی محسوب می‌شود (Paton & Johnston, 2017). بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی، در یک قرن گذشته بیش از ۱۱۵۰ زلزله مرگبار در ۷۵ کشور جهان ثبت شده است (Tian, Zhang, Yu & Cao, 2019). سالانه حدود ۵۰ هزار زلزله بزرگ رخ می‌دهد که برخی از آن‌ها به مناطق مسکونی آسیب جدی وارد می‌کنند (Alden, 2017). بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳، بیش از ۱۰ درصد از زلزله‌های با شدت $M \geq 6.0$ در یک بازه ۶۰ روزه و در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از زلزله‌ای بزرگ‌تر رخ داده‌اند (Taroni, Petrillo & Lippiello, 2025). همچنین، زلزله‌ها عامل حدود ۶۰ درصد از مرگ‌ومیر ناشی از مخاطرات طبیعی هستند و هزینه‌های هنگفتی بر جوامع تحمیل می‌کنند (Najafi Kani, 2021). بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳، بیش از ۱۰ درصد از زلزله‌ها با بزرگی ۶ و بالاتر، در یک بازه ۶۰ روزه و در فاصله کمتر از ۱۰۰ کیلومتر از زلزله‌ای بزرگ‌تر رخ داده‌اند (Taroni et al., 2025).

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود در کمربند تکتونیکی آلپ-همالیا و وجود گسل‌های فعال، از زلزله‌خیزترین کشورهای جهان است. تحلیل مکانی زلزله‌های ایران در بازه ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که بیشترین تعداد زمین‌لرزه در جنوب‌غرب کشور رخ داده، در حالی که زلزله‌های شدیدتر (بزرگ‌تر از ۷ ریشتر) عمدتاً در شرق و شمال‌غرب ایران متمرکز هستند (Ganjajean, 2024). همچنین، ساختار چین‌خوردگی‌های زاگرس با تمرکز کانون‌های زلزله رابطه مستقیم دارد (Ganjayan, 2023). بر اساس گزارش کمیته ملی کاهش اثرات بلایای طبیعی، ایران سالانه حداقل یک زلزله ۶ ریشتری و هر ۲۹ سال یک زلزله بزرگ‌تر از ۷ ریشتر را تجربه می‌کند (Najafi Kani, 2021). در فضاهای شهری، خطرپذیری به‌صورت یکنواخت توزیع نشده است و برخی نواحی از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردارند (Maleki, Amanpour, Shojaeeyan & Razavii, 2020). تحلیل الگوهای زمانی و مکانی زلزله با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و ابزارهای GIS، قادر است به‌طور مؤثری نقاط پرریسک را شناسایی کند (Parizi, Taleai & Sharifi, 2022). در مطالعه‌ای نیز آسیب‌پذیری لرزه‌ای کلان‌شهر لیسبون با داده‌های سرشماری و GIS ارزیابی شده و روش، مورد تأیید قرار گرفته است (Xofia et al., 2024).

مطالعات متعددی در زمینه زلزله و آسیب‌پذیری شهری انجام شده است. در پژوهشی، آسیب‌پذیری شهر دهرادون با استفاده از مدل Hazus ارزیابی شده و نشان داده شده است که این مدل، ابزار مناسبی برای کاهش خسارات زلزله محسوب می‌شود (Gulati, 2006). در پژوهشی دیگر، نقش GIS و سنجش از دور در مدل‌سازی آسیب‌پذیری شهر کالیفرنیا بررسی گردیده است (Rashed, 2007). همچنین، در مطالعه‌ای، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری زلزله پالو انجام شده و مشخص گردیده که منطقه ۲۲ بیشترین آسیب را دارد (Rusydi, Effendi & Rahmawati, 2017). در پژوهشی دیگر، تاب‌آوری کالبدی - محیطی مناطق تبریز بررسی شده و مشخص گردیده که ۱۱۵۴۶.۸۸ هکتار از مساحت شهر دارای سطح تاب‌آوری نسبتاً بالا و ۱۱۰۲.۳۹ هکتار دارای تاب‌آوری بسیار پایین است (Bahrehvar, Asgharizamani & Feizizadeh, 2023). در مطالعه‌ای، آسیب‌پذیری کاربری اراضی شهری جوانرود تحلیل شده و مشخص گردیده که حدود ۲۰ درصد از فضاهای شهری در معرض خطر متوسط تا بالا قرار دارند (Heidarifar, 2021). همچنین، فرصت‌های توسعه شهری پس از زلزله ۱۹۹۷ حاجی‌آباد بررسی شده و مشخص گردیده که شبکه ارتباطی بیشترین توسعه را داشته است (Hadiani, Hosseini & Biabani, 2021). در پژوهشی، میزان تاب‌آوری اجتماعی و کالبدی شهر ایزه بررسی شده و نشان داده شده است که نواحی شمالی و نورآباد آسیب‌پذیرترین مناطق هستند (Maleki et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر، تحلیل آماری زلزله‌های استان خوزستان انجام شده و مشخص گردیده که جهت وقوع زلزله‌ها از شمال‌غرب به جنوب‌شرق است (Afifi, 2020). همچنین، در پژوهشی پهنه‌بندی خطر زلزله در تبریز بررسی و مشخص شده که ۵۹.۳ درصد از شهر در معرض خطر بالا قرار دارد (Pashapour, Ghorbani, Farhadi & Daroudinia, 2019). در مطالعه‌ای، توزیع سکونتگاه‌های

شهری و روستایی در برابر زلزله در گیلان بررسی شده و مشخص گردیده که ۴۰.۷۲ درصد از مساحت استان در فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتری گسل‌های فعال قرار دارد (Azadeh & Taghvaei, 2017). اگرچه پژوهش‌های فوق در سطح منطقه‌ای بسیار مفید بوده‌اند، اما مطالعه‌ای با رویکرد فراگیر ملی و تحلیل زمانی و مکانی زلزله‌ها در سراسر کشور، هنوز به‌صورت جامع انجام نشده است. این پژوهش با هدف پر کردن این خلأ طراحی شده است.

زلزله، پدیده‌ای تصادفی در بُعد زمان و مکان تلقی می‌شود که از نظر آماری و زمین‌شناسی قابل تحلیل است (Hough, 2021). تحلیل‌های فضایی - زمانی به بررسی روند وقوع زلزله در مقیاس‌های مختلف پرداخته و به شناسایی الگوهای آن کمک می‌کند (Hashemi, 2022). همچنین، زمین‌لغزش به‌عنوان مخاطره‌ای ثانویه با زلزله پیوند دارد؛ به‌ویژه در مناطقی با شیب بالا، بافت سست و روان‌آب‌ها (Lajmorak & Piri, 2023)، استفاده از مدل‌های ترکیبی مانند AHP و بیز برای پهنه‌بندی خطر، در مدیریت بهینه این پدیده کاربرد دارد (Nazari Bayatiani, Jafar Beglou, Mohammad Khan & Maghsoudi, 2022).

مفهوم آسیب‌پذیری، که ابتدا توسط اکیف و همکاران (O'Keefe, Westgate & Wisner, 1976) مطرح شد، به حساسیت سیستم‌های اجتماعی - اقتصادی در برابر بلایای طبیعی اشاره دارد (Liu, Zheng, Lu & Li, 2022). این مفهوم شامل جنبه‌های مختلفی از جمله تراکم جمعیت، کیفیت ساخت‌وساز و میزان تاب‌آوری زیرساخت‌ها است (Oulahen, Mortsch, O'Connell, 2019; Harford & Rutledge, 2019). شهرهای آسیب‌پذیر معمولاً دارای ساختارهای ضعیف، تراکم بالا و مدیریت ناکارآمد در برابر بحران‌ها هستند (Oulahen et al., 2019; Smith, Fearnley, Dixon, Bird & Kelman, 2023). در همین راستا، مدیریت بحران به‌عنوان فرآیندی جهت کاهش خسارات شامل تحلیل، برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات فوری شناخته می‌شود (Zheng, Bi, Liu & Lowry, 2020).

در راستای تکمیل تحقیقات پیشین، هدف از این پژوهش، تحلیل فضایی - زمانی زلزله‌های ایران با تأکید بر شناسایی الگوهای توزیع مکانی و بررسی روند وقوع این مخاطره در بازه‌های زمانی مختلف است. در واقع، نوآوری پژوهش در آن است که برخلاف اغلب مطالعات پیشین که محدود به شهر یا استان خاصی بوده‌اند، این تحقیق برای نخستین‌بار داده‌های ۲۸ ساله زلزله را در سطح کشور، از سال ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳، تحلیل کرده و با مدل‌سازی‌های مکانی - زمانی تلفیق کرده و تصویری دقیق، کاربردی و سیاست‌پذیر برای مدیریت بحران ارائه می‌دهد. این رویکرد می‌تواند در سیاست‌گذاری کلان شهری و منطقه‌ای در مواجهه با بلایای طبیعی، به‌ویژه زلزله، مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر ماهیت، توصیفی - تحلیلی و از نظر روش، کمی و کاربردی است که با بهره‌گیری از تحلیل‌های آماری و مکانی انجام شده است. محدوده جغرافیایی مطالعه، تمامی پهنه سرزمینی ایران است که به‌دلیل قرارگیری در کمربند فعال زمین‌ساختی آلپ - هیمالیا، یکی از زلزله‌خیزترین کشورهای جهان محسوب می‌شود. بررسی‌ها براساس داده‌های زلزله‌های ثبت‌شده با بزرگی ۴ ریشتر و بالاتر در بازه زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ شمسی (۱۹۹۶-۲۰۲۴ میلادی) صورت گرفته است.

ابتدا اطلاعات زمین‌لرزه‌ها از سامانه مرکز لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استخراج و در قالب فایل‌های CSV گردآوری گردید. این داده‌ها شامل مختصات جغرافیایی (عرض و طول جغرافیایی)، عمق، بزرگی، زمان وقوع و محل تقریبی زلزله‌ها بود. سپس داده‌ها به محیط نرم‌افزار ArcGIS Pro منتقل و با استفاده از ابزار XY Table To Point به لایه‌های نقطه‌ای (Shapefile) تبدیل شدند.

در گام بعدی، لایه‌های پایه شامل مرزهای کشور، استان‌ها و شهرستان‌ها به پروژه افزوده شدند و داده‌های زلزله با ابزار Spatial Join به لایه‌های شهرستان‌ها پیوند خوردند تا بتوان تعداد رخدادها را در هر شهرستان محاسبه و تحلیل کرد. همچنین داده‌های مربوط به گسل‌های فعال ایران از سازمان زمین‌شناسی کشور دریافت و در محیط GIS تحلیل شد تا همپوشانی و ارتباط مکانی زلزله‌ها با ساختارهای زمین‌شناختی مورد بررسی قرار گیرد.

در مرحله تحلیل، از ابزارها و روش‌های مختلف آماری و مکانی استفاده شد. برای بررسی الگوی توزیع فضایی زمین‌لرزه‌ها، از روش تخمین تراکم کرنل^۱ برای بررسی الگوی توزیع فضایی زمین‌لرزه‌ها و تعیین مناطق با بیشترین تجمع رخدادها استفاده گردید. همچنین، تحلیل حریم^۲ برای ارزیابی تأثیر فاصله شهرها از کانون زلزله‌ها به کار رفت تا مشخص شود کدام مناطق در معرض خطر بیشتری قرار دارند. علاوه بر این، برای شناسایی نواحی دارای خوشه‌های زلزله، از روش تحلیل لکه‌های داغ^۳ استفاده شد که از شاخص Getis-Ord Gi* برای تشخیص نواحی با تراکم بالای زلزله، بهره می‌برد. در نهایت، با استفاده از ابزارهای GIS، نقشه‌های تحلیلی تولید شد که توزیع فضایی زلزله‌ها، میزان تأثیر آن‌ها بر مناطق شهری و میزان همبستگی آن‌ها با گسل‌های فعال کشور را نمایش می‌دهد.

نتایج

یافته‌های توصیفی

الف) وضعیت کلی گسل‌ها و مخاطرات لرزه‌ای ایران

الگوی توزیع فضایی گسل‌ها در ایران (شکل ۱) نشان می‌دهد که مناطق کوهستانی همچون رشته‌کوه‌های البرز، زاگرس و کپه‌داغ دارای تراکم بیشتری از گسل‌های فعال هستند. در مقابل، نواحی مرکزی کشور مانند دشت کویر و دشت لوت به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناختی، گسل‌های کمتری دارند. این توزیع فضایی ارتباط مستقیمی با ساختار زمین‌شناسی ایران دارد که ناشی از برخورد صفحات زمین‌ساختی عربستان و اوراسیا است.

تمرکز بالای گسل‌ها در برخی مناطق نشان‌دهنده سطح بالای خطر لرزه‌ای در این مناطق است. مناطقی مانند شمال غرب، شمال و شمال شرق ایران به دلیل وجود گسل‌های فعال، مستعد زمین‌لرزه‌های مخرب هستند. این مناطق به دلیل تراکم بالای جمعیت و توسعه شهری سریع، دارای ریسک بالاتری نسبت به سایر مناطق هستند. مناطقی که دارای تراکم گسل بالا هستند نیازمند نظارت بیشتر بر فعالیت‌های ساختمانی و اجرای دقیق ضوابط ساخت‌وساز مقاوم در برابر زلزله هستند. تخلفات ساختمانی در چنین مناطقی می‌تواند به افزایش آسیب‌پذیری شهری منجر شود. همپوشانی مکانی بین مناطق دارای تخلفات ساختمانی و محدوده‌های گسلی می‌تواند به عنوان شاخصی برای ارزیابی ریسک لرزه‌ای در برنامه‌ریزی شهری مورد استفاده قرار گیرد.

تحلیل فضایی تخلفات ساختمانی در مناطق زلزله‌خیز می‌تواند به شناسایی مناطق با ریسک بالای ترکیبی کمک کند. این مناطق به دلیل همزمانی عوامل طبیعی (گسل‌های فعال) و انسانی (تخلفات ساختمانی) دارای آسیب‌پذیری بالاتری هستند. نتایج این تحلیل می‌تواند مبنای تدوین برنامه‌های پیشگیرانه و اجرای طرح‌های مقاوم‌سازی شهری باشد.

ب) توزیع زمانی زمین‌لرزه‌های ایران طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ هجری شمسی

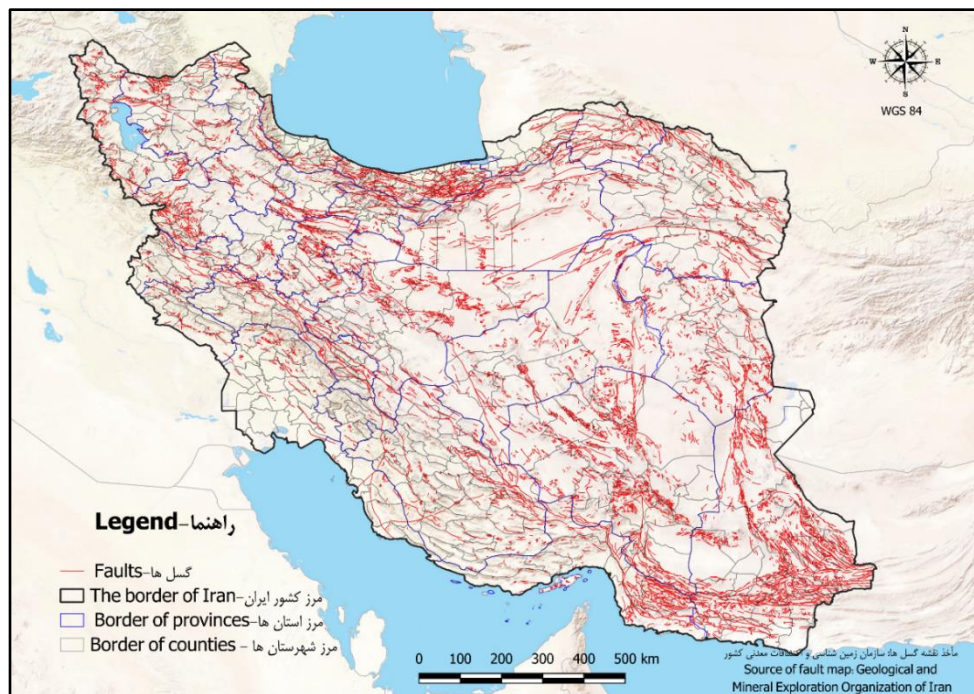
بررسی داده‌های ارائه شده در شکل ۲، نشان‌دهنده نوسانات قابل توجهی در تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده طی بازه ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ هجری شمسی است. در این دوره، کمترین تعداد زمین‌لرزه ثبت‌شده مربوط به سال‌های ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۴ با ۹۲ رخداد است،

1- Kernel Density Estimation

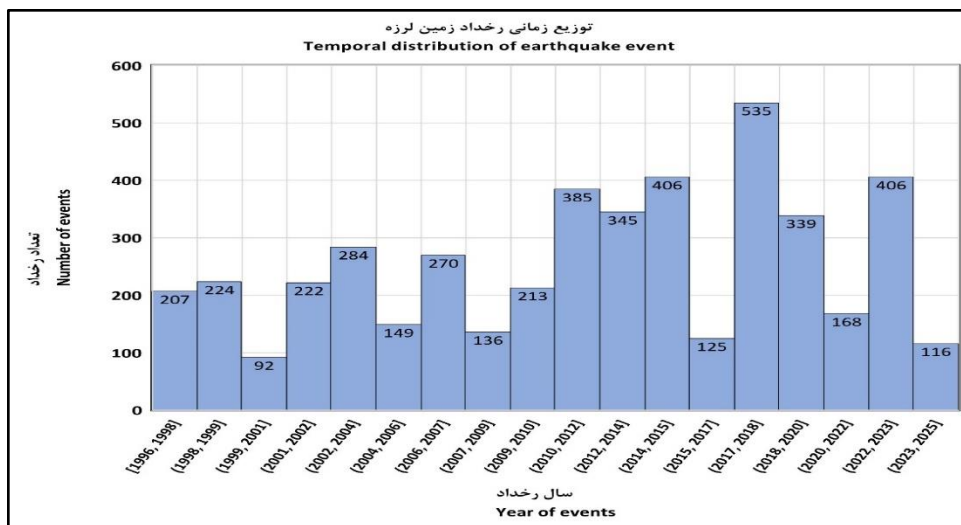
2- Buffer Analysis

3- Hot Spot Analysis

درحالی که بیشترین تعداد زمین لرزه در بازه ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۳ با ۵۳۵ رخداد به ثبت رسیده است. این اختلاف بیش از ۵ برابری نشان دهنده تغییرات قابل ملاحظه در فعالیت های لرزه ای یا ظرفیت شبکه های پایش زلزله در طول زمان است. بررسی روند کلی نشان می دهد که طی دهه های اخیر، تعداد زمین لرزه های ثبت شده افزایش یافته است، به طوری که میانگین سالانه رخداد زلزله در بازه ۱۳۷۵ الی ۱۴۰۳ حدود ۲۷۰ زلزله بوده است. در برخی دوره ها، تعداد رخداد های لرزه ای افزایش شدید داشته است، از جمله در بازه های ۱۳۸۵ الی ۱۳۸۹ با ۲۸۴ رخداد، ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۴ با ۳۸۵ رخداد و ۱۳۹۵ الی ۱۳۹۹ با ۴۰۶ رخداد که می تواند ناشی از فعال شدن گسل های اصلی، افزایش تنش های تکتونیکی، یا بهبود شبکه های لرزه نگاری باشد. در مقابل، در بازه های ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۴ با ۹۲ رخداد، ۱۳۸۵ الی ۱۳۸۹ با ۱۴۹ رخداد و ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۳ با ۱۱۶ رخداد، کاهش چشمگیری مشاهده می شود که این افت می تواند ناشی از دوره های آرامش لرزه ای یا کاستی های ثبت داده در آن دوره ها باشد.



شکل ۱- پراکنش گسل های ایران
Fig.1. Distribution of Faults in Iran



شکل ۲- توزیع زمانی زمین‌لرزه‌های ایران طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ هجری شمسی (منبع: پایگاه داده‌های لرزه‌نگاری ایران)

Fig.2. Temporal distribution of earthquakes in Iran from 1996 to 2024

از دهه ۱۳۹۰ به بعد، یک روند افزایشی در تعداد رخداد‌های ثبت‌شده دیده می‌شود که احتمالاً به توسعه فناوری‌های لرزه‌نگاری و افزایش حساسیت ایستگاه‌های ثبت زلزله مرتبط است. این روند بیانگر آن است که علاوه بر تغییرات طبیعی در فعالیت‌های لرزه‌ای، پیشرفت‌های علمی و فنی نیز تأثیر قابل‌توجهی در افزایش ثبت و تحلیل رخداد‌های لرزه‌ای داشته‌اند. به‌طور کلی، تحلیل کمی داده‌های ارائه‌شده نشان می‌دهد که تغییرات قابل‌توجهی در فعالیت لرزه‌ای ایران طی این سال‌ها رخ داده است و برخی دوره‌ها شاهد افزایش شدید زلزله‌ها بوده‌اند که می‌تواند به فعال شدن گسل‌های مهم و افزایش تنش‌های زمین‌ساختی مرتبط باشد. از سوی دیگر، در برخی سال‌ها کاهش چشمگیری در تعداد زلزله‌های ثبت‌شده مشاهده می‌شود که ممکن است به دوره‌های آرامش نسبی پوسته زمین یا محدودیت‌های تاریخی در ثبت زلزله‌ها مرتبط باشد.

ج) توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های ایران با بزرگی ۴ ریشتر و بالاتر

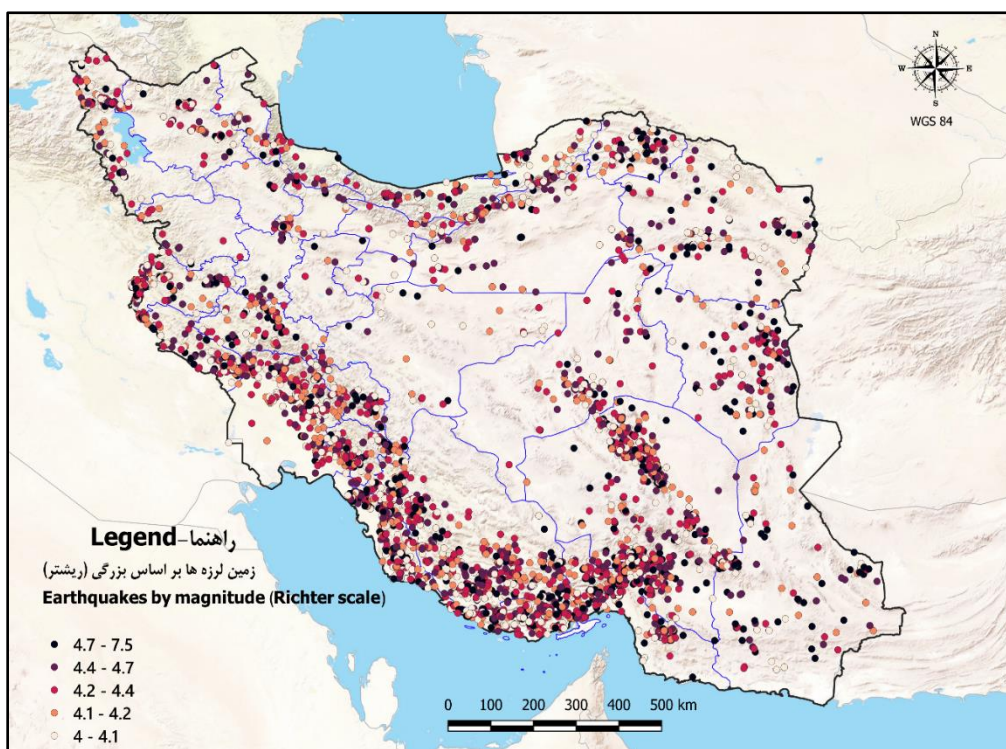
نقشه توزیع زمین‌لرزه‌ها با بزرگی ۴ ریشتر و بیشتر در ایران (شکل ۳) الگوی فضایی لرزه‌خیزی در مناطق مختلف کشور را نشان می‌دهد. تراکم زمین‌لرزه‌ها در مناطق شمال‌غرب، شمال، جنوب‌غرب و شرق ایران به دلیل قرارگیری بر روی گسل‌های فعال بیشتر است، در حالی که نواحی مرکزی کشور دارای تراکم کمتری هستند. زمین‌لرزه‌های با بزرگی بالای ۴ ریشتر عمدتاً در امتداد گسل‌های فعال و نواحی کوهستانی رخ داده‌اند. مناطق البرز، خراسان، زاگرس و جنوب ایران بیشترین رخداد‌های لرزه‌ای را نشان می‌دهند که ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی است. توزیع فضایی زمین‌لرزه‌ها در مناطق شرقی و جنوب شرقی نیز بیانگر فعال بودن گسل‌های امتداد لغز است. تراکم بالای زمین‌لرزه‌ها در برخی مناطق شهری، ضرورت مقاوم‌سازی را افزایش می‌دهد. همپوشانی مناطق لرزه‌خیز با تخلقات ساختمانی می‌تواند شاخصی برای ارزیابی ریسک باشد.

د) توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های ایران بر اساس عمق (کیلومتر)

نقشه توزیع عمق زمین‌لرزه‌ها در ایران (شکل ۴) نشان‌دهنده ویژگی‌های زمین‌ساختی مناطق مختلف است. زمین‌لرزه‌های کم‌عمق (کمتر از ۱۰ کیلومتر) معمولاً خسارت بیشتری به مناطق مسکونی وارد می‌کنند، در حالی که زمین‌لرزه‌های عمیق‌تر با دامنه انتشار وسیع‌تر، تأثیر کمتری بر سطح زمین دارند.

تحلیل نقشه، نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های کم‌عمق با تراکم بالاتر در مناطق زاگرس، البرز و شمال‌شرق ایران ثبت شده‌اند. این مناطق به دلیل فعالیت گسل‌های سطحی و ساختار زمین‌شناسی پیچیده، مستعد وقوع زمین‌لرزه‌های کم‌عمق هستند. در جنوب ایران و به ویژه مناطق نزدیک به خلیج فارس، عمق زمین‌لرزه‌ها بیشتر است که با فعالیت‌های تکتونیکی در ارتباط با مرز صفحات عربستان و اوراسیا همخوانی دارد. در نواحی شرقی ایران مانند منطقه مکران و جنوب شرق، زمین‌لرزه‌های عمیق‌تری مشاهده می‌شود که ناشی از فروانش صفحه عمان به زیر صفحه اوراسیا است. این رخدادها معمولاً با بزرگی بیشتر و عمق زیاد همراه هستند، اما خسارت کمتری به مناطق مسکونی وارد می‌کنند.

زمین‌لرزه‌های کم‌عمق در مناطق پرجمعیت و شهری تهدید جدی‌تری برای زیرساخت‌های شهری محسوب می‌شوند. در مناطقی که تخلفات ساختمانی و ساخت‌وسازهای غیرمجاز وجود دارد، احتمال افزایش خسارت ناشی از این نوع زمین‌لرزه‌ها بیشتر است. بنابراین، نظارت دقیق‌تر بر ساخت‌وسازها و رعایت استانداردهای مقاوم‌سازی در این مناطق ضروری به نظر می‌رسد.

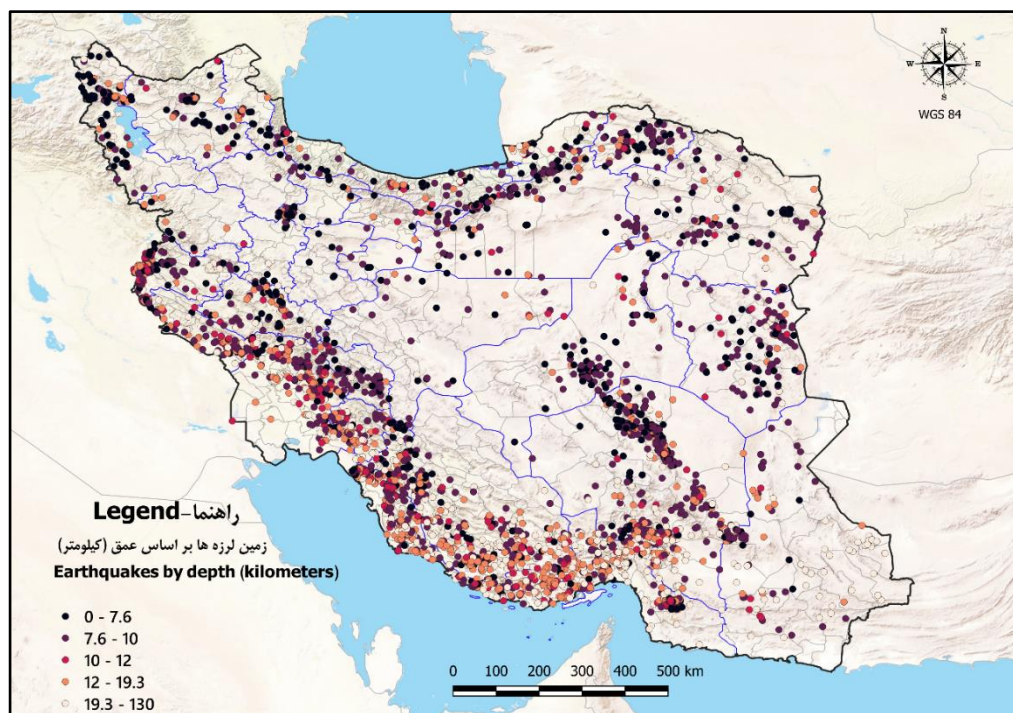


شکل ۳- پراکنش زمین‌لرزه‌های ایران با بزرگی ۴ ریشتر و بالاتر

Fig.3. Distribution of Earthquakes in Iran with Magnitude 4 and Above

الگوی فضایی عمق زمین‌لرزه‌ها می‌تواند برای ارزیابی خطرپذیری مناطق مختلف و تدوین برنامه‌های کاهش خطر زلزله مورد استفاده قرار گیرد. تمرکز زمین‌لرزه‌های کم‌عمق در مناطق زلزله‌خیز نیازمند اجرای سیاست‌های مدیریت بحران، مقاوم‌سازی

ساختمان‌ها و افزایش آگاهی عمومی درباره نحوه مقابله با حوادث طبیعی است. بررسی ارتباط بین عمق زمین‌لرزه‌ها، پراکنش تخلفات ساختمانی و توزیع جمعیت می‌تواند به اولویت‌بندی مناطق آسیب‌پذیر و بهبود برنامه‌های مدیریت بحران کمک کند.



شکل ۴- پراکنش زمین‌لرزه‌های ایران بر اساس عمق (کیلومتر)

Fig.4. Distribution of Earthquakes in Iran Based on Depth (Kilometers)

یافته‌های تحلیلی

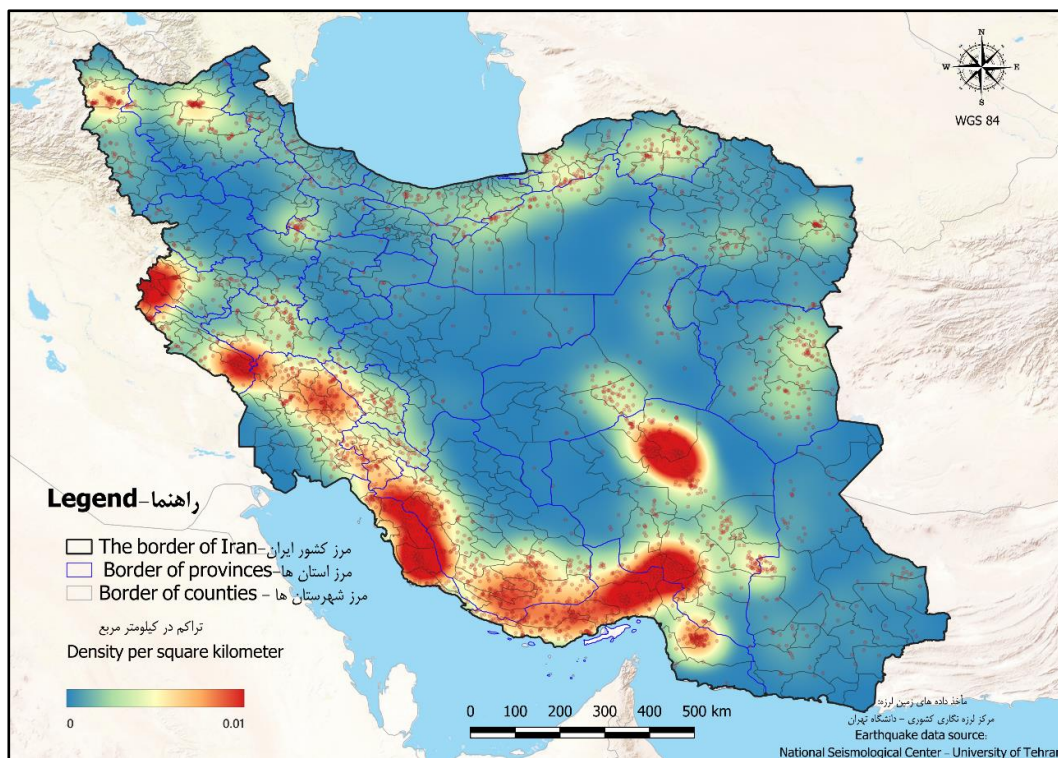
الف) تحلیل تراکم فضایی زمین‌لرزه‌ها (تحلیل تراکم کرنل)

نقشه تراکم کرنل زمین‌لرزه‌های ایران (شکل ۵) که با استفاده از داده‌های مرکز لرزه‌نگاری کشوری دانشگاه تهران تهیه شده، نشان‌دهنده توزیع فضایی زمین‌لرزه‌ها در سراسر کشور است. این نقشه، تراکم زمین‌لرزه‌ها را از طریق طیف رنگی از آبی (کمترین تراکم) تا قرمز (بیشترین تراکم) به تصویر کشیده و مناطق دارای لرزه‌خیزی بالا را مشخص کرده است. تحلیل این نقشه نشان می‌دهد که بیشترین تمرکز زمین‌لرزه‌ها در امتداد رشته‌کوه زاگرس مشاهده می‌شود. این منطقه که از شمال غرب تا جنوب غرب کشور امتداد دارد، تحت تأثیر گسل‌های فعال و برخورد صفحات تکتونیکی عربستان و اوراسیا قرار دارد. استان‌هایی مانند کرمانشاه، لرستان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و فارس در این ناحیه قرار گرفته‌اند و به دلیل فعالیت بالای گسل‌ها، از مناطق مستعد وقوع زمین‌لرزه محسوب می‌شوند. علاوه بر این، نوار جنوبی کشور، به‌ویژه استان‌های هرمزگان و سیستان و بلوچستان، نیز دارای تراکم بالای زمین‌لرزه هستند. این امر به دلیل حضور گسل‌های فعال در امتداد سواحل خلیج فارس و دریای عمان است که موجب زلزله‌های مکرر در این نواحی شده است. یکی دیگر از نقاط پرلرزه ایران، استان کرمان است که به دلیل وجود چندین گسل فعال، از جمله گسل‌های جبال بارز و نایبند، همواره در معرض زلزله‌های شدید قرار دارد. همچنین، مناطق شمال غرب ایران شامل استان‌های آذربایجان غربی و شرقی نیز دارای

تراکم متوسط تا بالایی از زلزله هستند که به دلیل فعالیت گسل‌های اصلی مانند گسل تبریز است. در مقابل، بخش‌هایی از مرکز و شرق کشور دارای تراکم پایین‌تری از زمین‌لرزه‌ها بوده و فعالیت لرزه‌ای در این مناطق نسبتاً کمتر است.

از منظر شهرسازی و برنامه‌ریزی شهری، نقشه تراکم زلزله‌های ایران اهمیت بالایی در مدیریت ریسک و کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله دارد. شهرهای واقع در مناطق قرمز این نقشه باید دارای الزامات سختگیرانه‌تری در طراحی سازه‌ها و اجرای استانداردهای مقاوم‌سازی ساختمان باشند. توسعه زیرساخت‌های مقاوم، نظیر ساختمان‌های ضدزلزله و شبکه‌های خدماتی ایمن، از جمله اقدامات ضروری در این مناطق است. برنامه‌ریزی شهری باید به گونه‌ای باشد که از گسترش بی‌رویه شهرها در مناطق پرخطر جلوگیری کرده و به جای آن، الگوهای توسعه پایدار را در دستور کار قرار دهد.

نتایج این تحلیل، می‌تواند به تدوین راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری مناطق پرخطر و ارتقای سطح ایمنی در برابر زلزله کمک کند. مقایسه این نقشه با داده‌های گسل‌های فعال، جمعیت‌شناسی و توسعه شهری می‌تواند منجر به ارائه مدل‌های بهینه برای کاهش خسارات و بهبود تاب‌آوری شهرها در برابر زمین‌لرزه شود. از این رو، پژوهش‌های آتی باید به بررسی دقیق‌تر رابطه میان توزیع فضایی زلزله‌ها و برنامه‌ریزی شهری پرداخته و راهکارهای اجرایی برای کاهش مخاطرات زلزله در ایران ارائه دهند.



شکل ۵- نقشه توزیع تراکم فضایی زمین‌لرزه‌ها در ایران بر اساس روش کرنل تراکم

Fig.5. Spatial Density Distribution of Earthquakes in Iran Based on Kernel Density Estimation

ب) تحلیل لکه‌های داغ: آماره Gi^* Getis-Ord

نقشه ارائه شده در شکل ۶، تحلیل لکه‌های داغ و سرد زمین‌لرزه‌های ایران را نمایش می‌دهد که از طریق تحلیل آماری و روش‌های خوشه‌بندی فضایی به دست آمده است. در این تحلیل، فیلد ورودی داده‌های زمین‌لرزه‌های ثبت شده در سطح کشور در نظر گرفته شد و برای مفهوم‌سازی فضایی، روش Zone of Indifference انتخاب گردید. این روش امکان در نظر گرفتن تأثیرات مکانی زمین‌لرزه‌ها را فراهم می‌کند و باعث می‌شود نقاطی که به‌طور نسبی بیشترین یا کمترین رخدادهای لرزه‌ای را تجربه کرده‌اند، در یک دسته‌بندی فضایی مشخص قرار گیرند.

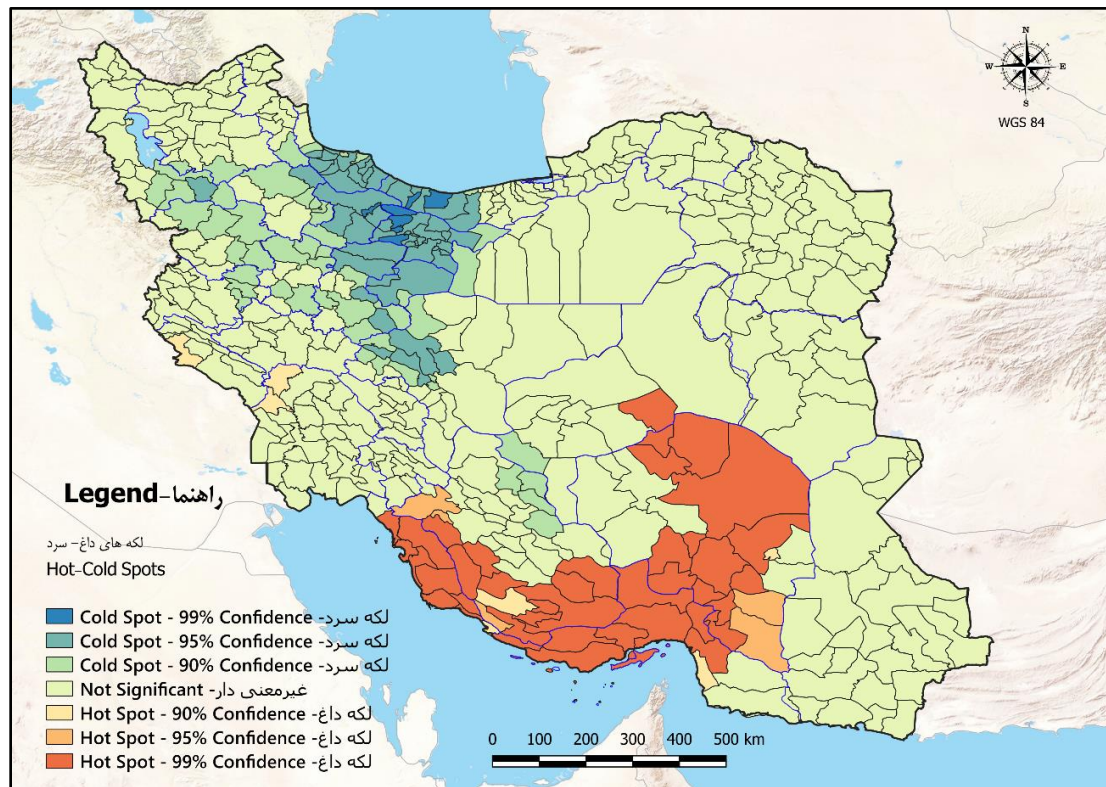
بر این اساس، نقشه نشان می‌دهد که مناطق مختلف کشور از نظر تمرکز و توزیع زمین‌لرزه‌ها دارای الگوهای مشخصی هستند و بر اساس سطح اطمینان به مناطق لکه‌های داغ^۱ و لکه‌های سرد^۲ تقسیم شده‌اند. لکه‌های داغ (قرمز و نارنجی) نشان‌دهنده نواحی با زمین‌لرزه‌های متمرکز و همجوار هستند، در حالی که لکه‌های سرد (آبی) مناطق با پراکندگی کمتر زمین‌لرزه را مشخص می‌کنند. این روش صرفاً توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های گذشته و نحوه خوشه‌بندی آن‌ها را نمایش می‌دهد و لزوماً به معنای افزایش احتمال وقوع زلزله در آینده نیست.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که نواحی جنوب و جنوب شرقی کشور، از جمله استان‌های هرمزگان، کرمان، سیستان و بلوچستان و بخش‌هایی از فارس، به عنوان لکه‌های داغ زلزله با سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ مشخص شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده فعالیت بالای زمین‌لرزه در این مناطق است که به دلیل حضور گسل‌های فعال، مانند گسل مکران و گسل‌های هرمزگان، رخ می‌دهد. این نواحی به دلیل برخورد صفحات تکتونیکی و شکست‌های ساختاری مستعد زمین‌لرزه‌های مکرر و شدید هستند.

در مقابل، مناطق شمال غربی و بخش‌هایی از غرب ایران، از جمله استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل و زنجان، به عنوان لکه‌های سرد زلزله شناسایی شده‌اند. این مناطق دارای سطح لرزه‌خیزی پایین‌تری هستند و بر اساس تحلیل آماری، فعالیت زمین‌لرزه‌ای آن‌ها نسبت به سایر مناطق کمتر است.

بخش‌های مرکزی و شمال شرقی کشور، از جمله تهران، اصفهان و خراسان رضوی، در دسته مناطق غیرمعنی‌دار قرار گرفته‌اند که نشان می‌دهد فعالیت زلزله در این نواحی از نظر آماری قابل توجه نیست. اما این به معنای عدم خطر زلزله در این مناطق نیست، بلکه نشان‌دهنده این است که تراکم زمین‌لرزه‌ها در این نقاط به اندازه لکه‌های داغ بالا یا لکه‌های سرد پایین نیست.

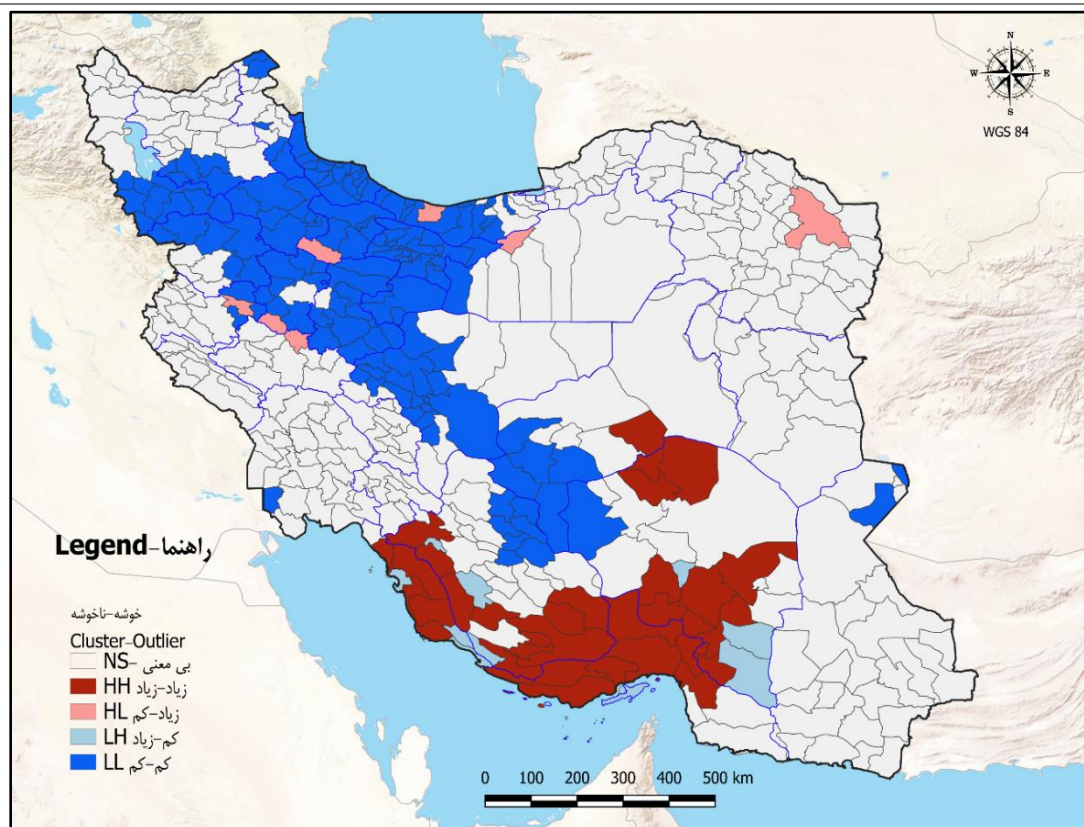
از منظر برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران، این نقشه اهمیت بالایی در تدوین استراتژی‌های کاهش ریسک دارد. مناطق لکه‌های داغ باید تحت نظارت‌های شدید مهندسی زلزله قرار گیرند و الزامات ساخت‌وساز مقاوم در برابر زلزله برای این نواحی به‌طور جدی‌تر اعمال شود. در مقابل، در مناطق لکه‌های سرد، تمرکز بر سایر مخاطرات طبیعی مانند سیل یا فرونشست زمین می‌تواند اولویت داشته باشد.



شکل ۶- نقشه لکه های داغ و سرد زمین لرزه های ایران
Fig.6. Hot and Cold Spots Map of Earthquakes in Iran

ج) الگوی فضایی زمین لرزه ها با روش خوشه - ناخوشه: تحلیل موران محلی انسلین^۱
نقشه ارائه شده در شکل ۷، تحلیل خوشه بندی فضایی زمین لرزه های ایران را نشان می دهد که مناطق مختلف را بر اساس تراکم و شدت وقوع زلزله به دسته های معنادار طبقه بندی کرده است. این تحلیل به شناسایی الگوهای مکانی زلزله های پرتکرار و کم تکرار کمک کرده و از این طریق امکان درک بهتری از پراکندگی خطرات لرزه ای را فراهم می آورد. نقشه، شامل پنج دسته اصلی خوشه بندی است که در آن مناطق «زیاد-زیاد (HH)» و «کم-کم (LL)» نمایانگر بالاترین و پایین ترین تراکم زلزله هستند، درحالی که سایر دسته ها نشان دهنده مناطق گذار یا ناهنجاری های مکانی در توزیع زلزله ها هستند.

1- Anselin's Local Moran's I



شکل ۷- نقشه خوشه-ناخوشه زمین‌لرزه‌های ایران (تحلیل موران محلی انسلین)

Fig.7. Cluster and Outlier Map of Earthquakes in Iran (Anselin's Local Moran's I Analysis)

تحلیل نقشه نشان می‌دهد که مناطق جنوبی و جنوب شرقی ایران، از جمله استان‌های هرمزگان، فارس، کرمان، سیستان و بلوچستان و بوشهر، در دسته «زیاد-زیاد (HH)» قرار گرفته‌اند. این نواحی دارای بیشترین فراوانی زمین‌لرزه‌ها هستند و به عنوان نقاط بحرانی از نظر فعالیت لرزه‌ای شناخته می‌شوند. وجود گسل‌های فعال مانند زاگرس و مکران باعث افزایش زلزله‌های مکرر شده و نیاز به برنامه‌ریزی دقیق برای مقاوم‌سازی و مدیریت بحران را ضروری می‌سازد. در مقابل، مناطق شمالی و شمال غربی کشور، از جمله استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان، کردستان و بخش‌هایی از خراسان شمالی، در گروه «کم - کم (LL)» قرار گرفته‌اند. این مناطق دارای لرزه‌خیزی پایینی هستند و از نظر آماری کمترین تراکم زلزله را دارند. دلیل این وضعیت می‌تواند به پایداری نسبی ساختار زمین‌شناسی و فاصله از گسل‌های فعال مرتبط باشد.

علاوه بر این، برخی مناطق در دسته «زیاد-کم (HL)» و «کم-زیاد (LH)» قرار دارند. مناطق «زیاد-کم (HL)»، که به صورت پراکنده در نقشه دیده می‌شوند، نشان‌دهنده مناطقی هستند که نسبت به مناطق اطراف خود فعالیت لرزه‌ای بیشتری دارند اما در کل تراکم زلزله در آن‌ها کمتر است. این مناطق نیاز به بررسی دقیق‌تری دارند زیرا احتمال دارد که گسل‌های نهفته یا لرزه‌های نهفته در آن‌ها فعال شوند. از سوی دیگر، مناطق «کم-زیاد (LH)»، که در شمال شرق کشور و برخی نقاط مرکزی دیده می‌شوند، مناطقی هستند که به‌طور کلی لرزه‌خیزی پایینی دارند اما در برخی نقاط فعالیت زلزله‌ای بالاتر از حد انتظار است. این نقشه در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران برای تعیین اولویت‌های مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها و تخصیص منابع اهمیت دارد. مناطق «زیاد - زیاد» باید به‌عنوان نقاط بحرانی مقاوم‌سازی شوند، در حالی که در مناطق «کم - کم» تمرکز بر مخاطرات ژئوتکنیکی مانند فرونشست یا سیل باید اولویت یابد. مناطق گذار نیز نیاز به مطالعه دقیق برای شناسایی تغییرات لرزه‌ای دارند.

د) تحلیل لکه‌های داغ و چندضلعی‌های منظم برای شناسایی کانون‌های پرخطر زلزله در ایران

نقشه شکل ۸، نشان‌دهنده توزیع خطر زمین‌لرزه در ایران با استفاده از روش تحلیل لکه‌های داغ و مدل‌سازی مبتنی بر چندضلعی‌های منظم است. به منظور افزایش دقت در شناسایی کانون‌های پرخطر، از روش Generate Hexagons برای ایجاد واحدهای فضایی کوچک با مساحت ۲۰۰ کیلومتر مربع استفاده شده است. این امر باعث شده که مناطق پرریسک با جزئیات بیشتری مشخص شوند و بتوان شهرهای مختلف را بر اساس میزان خطرپذیری لرزه‌ای دسته‌بندی کرد.

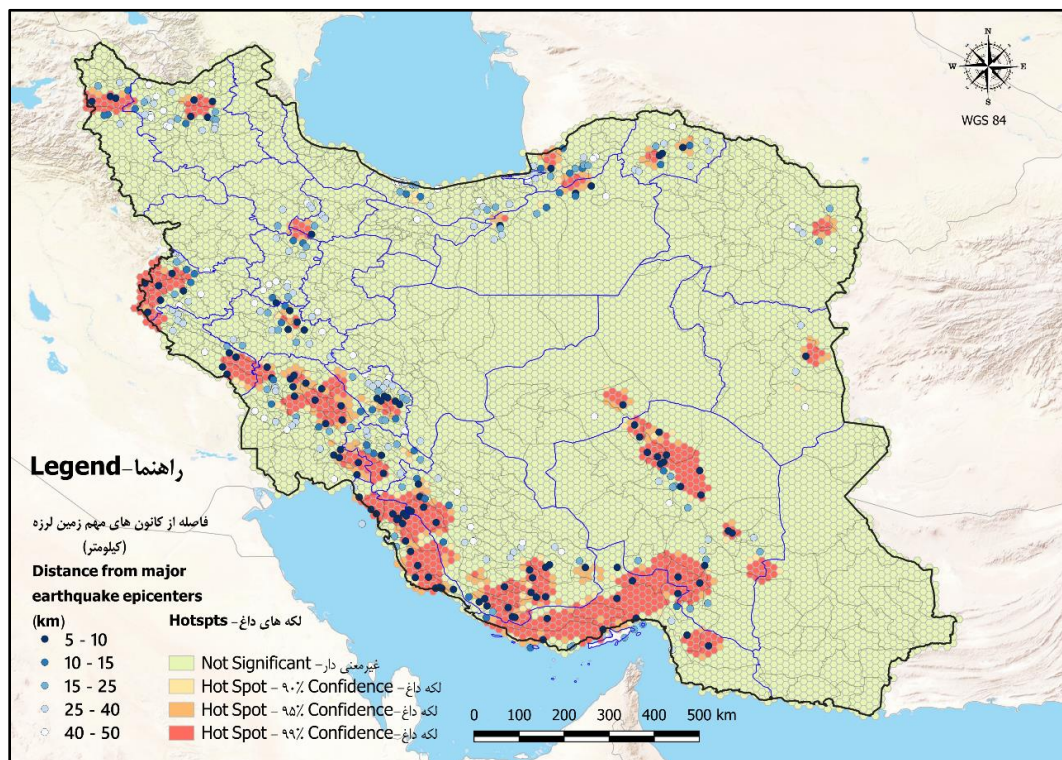
بر اساس نتایج این تحلیل، بیشترین تمرکز زلزله‌ها در نواحی غربی، جنوب غربی، و جنوب شرقی کشور مشاهده می‌شود. این مناطق، که عمدتاً در امتداد گسل‌های فعال مانند زاگرس، مکران، و دیگر ساختارهای تکتونیکی قرار دارند، بیشترین احتمال وقوع زلزله‌های مخرب را دارند. همچنین، نقشه نشان می‌دهد که بسیاری از شهرهای ایران در فاصله نزدیک به کانون‌های زلزله قرار گرفته‌اند، که این امر خطر آسیب‌پذیری سازه‌ها و زیرساخت‌ها را به شدت افزایش می‌دهد.

تحلیل لکه‌های داغ نشان می‌دهد که بیشترین فعالیت لرزه‌ای در جنوب و غرب کشور، به‌ویژه در استان‌های فارس، بوشهر، کهگیلویه و بویراحمد، کرمانشاه و لرستان متمرکز است. این مناطق به دلیل گسل‌های فعال، با اطمینان ۹۹ درصدی در معرض زلزله‌های مکرر قرار دارند. همچنین، سواحل خلیج فارس و دریای عمان به دلیل نزدیکی به گسل مکران و گسل‌های فرعی مرتبط، در معرض خطر بالای زمین‌لرزه و سونامی هستند.

روش تحلیل چندضلعی‌های منظم در این نقشه کمک کرده تا نقاط داغ لرزه‌ای در مقیاسی کوچک‌تر مورد بررسی قرار گیرند. این امر نه تنها باعث افزایش دقت شناسایی مناطق پرخطر شده است، بلکه امکان مقایسه شهرهای مختلف و میزان نزدیکی آن‌ها به مراکز زلزله را نیز فراهم کرده است. در نتیجه، این روش می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرد.

از نظر آماری، مناطق قرمز در این نقشه، نشان‌دهنده بیشترین میزان خطر زلزله هستند، درحالی‌که مناطق زرد و آبی با کاهش تدریجی خطر همراه هستند. مناطق با فاصله کمتر از ۱۴ کیلومتر از کانون‌های زلزله، بیشترین میزان خطر را نشان می‌دهند، اما باید توجه داشت که حتی در فاصله‌های بیشتر از ۴۰ کیلومتر نیز زلزله‌های قدرتمند می‌توانند خسارات قابل توجهی ایجاد کنند.

نتایج این تحلیل برای سیاست‌گذاران، مهندسان زلزله و مدیران بحران بسیار مفید بوده و با شناسایی دقیق نقاط داغ زمین‌لرزه، امکان تدوین استراتژی‌های مقاوم‌سازی، بهبود مدیریت بحران و تخصیص بهینه منابع را فراهم می‌کند. علاوه بر این، اجرای سیستم‌های هشدار سریع، افزایش آگاهی عمومی و وضع قوانین سخت‌گیرانه‌تر در ساخت‌وساز می‌تواند نقش مهمی در کاهش خسارات جانی و مالی ایفا کند. این نقشه ضرورت توجه به مناطق پرخطر زلزله در ایران را نشان داده و بر اهمیت برنامه‌ریزی علمی برای کاهش آسیب‌ها تأکید دارد. استفاده از روش‌های تحلیلی مبتنی بر داده‌های فضایی و لکه‌های داغ، شناخت بهتر الگوهای لرزه‌ای و بهبود سیاست‌های مدیریت بحران را امکان‌پذیر کرده و در نهایت به افزایش تاب‌آوری شهرهای ایران در برابر زلزله منجر می‌شود.

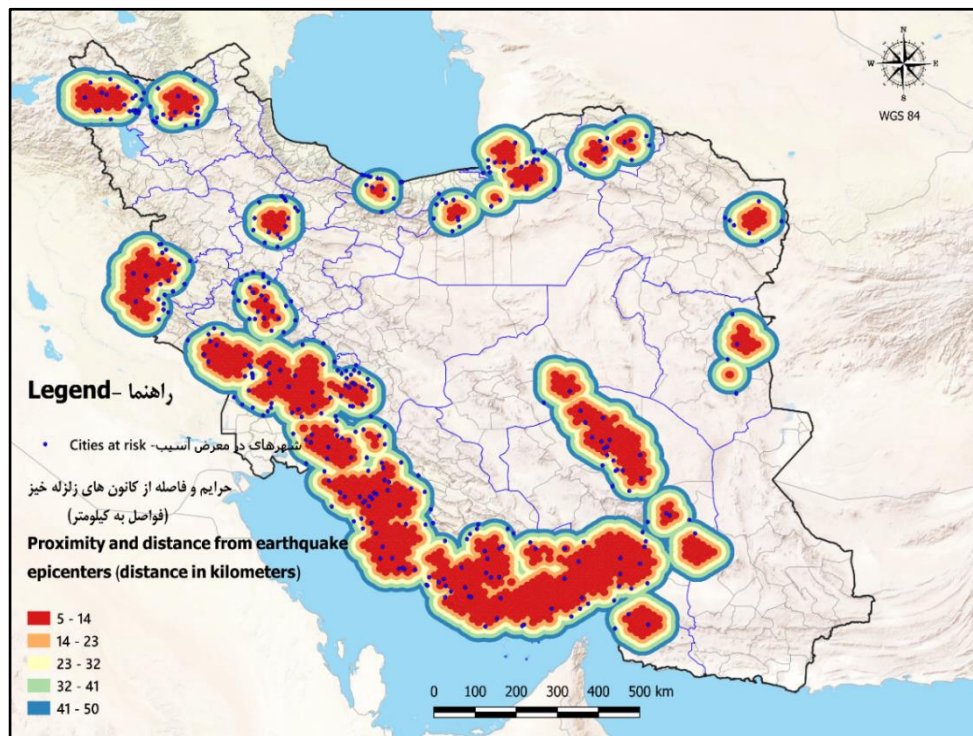


شکل ۸- شهرهای در معرض خطر آسیب پذیری ناشی از زمین لرزه بر اساس تحلیل لکه‌های داغ و چندضلعی‌های منظم
Fig.8. Cities at Risk of Earthquake Vulnerability Based on Hotspot Analysis and Regular Polygons

ه) تحلیل لکه‌های داغ و چندضلعی‌های منظم برای شناسایی کانون‌های پرخطر زلزله در ایران

در شکل شماره ۹، با استفاده از روش لکه‌های داغ و مدل‌سازی چندضلعی‌های منظم، کانون‌های پرخطر زلزله در ایران شناسایی شده است. با تمرکز بر شهرهای آسیب‌پذیر، ابتدا نقاط مرکزی لکه‌های داغ، که در جدول اطلاعات توصیفی دارای مقادیر ۱ تا ۳ هستند، استخراج شد. این نقاط به‌عنوان کانون‌های لرزه‌خیز اصلی در نظر گرفته شده و برای بررسی تأثیر آنها، از روش Centroids جهت تعیین مرکز دقیق این مناطق استفاده شده است. سپس با بهره‌گیری از تکنیک Multi Buffers، محدوده‌هایی از ۱ تا ۵۰ کیلومتر پیرامون این نقاط ایجاد شد. این محدوده‌ها به داده‌های شهری متصل شده تا مشخص شود کدام شهرها در این حریم قرار گرفته‌اند و هر شهر در چه فاصله‌ای از مراکز لرزه‌خیزی واقع شده است.

نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که شهرهای واقع در فاصله ۰ تا ۱۴ کیلومتری از کانون‌های زلزله‌خیز (حریم قرمز) بیشترین خطر را دارند، در حالی که شدت خطر با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. با این حال، تجربه زمین‌لرزه‌های گذشته نشان داده که حتی شهرهایی که در فاصله ۴۰ کیلومتری یا بیشتر از این کانون‌ها قرار دارند، در صورت وقوع زلزله‌های شدید ممکن است دچار آسیب‌های جدی شوند، به‌ویژه در مناطقی که دارای زیرساخت‌های مقاوم نیستند. تحلیل نقشه‌ها و مدل‌سازی فضایی نشان می‌دهد که بیشترین تجمع کانون‌های خطر در نواحی غربی، جنوب غربی و جنوب شرقی کشور قرار دارد. مناطق وسیعی از زاگرس، سواحل خلیج فارس و دریای عمان، و بخش‌هایی از شمال کشور در محدوده قرمز قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده بیشترین میزان خطر زلزله در این مناطق است. ارتباط این کانون‌ها با گسل‌های فعال کشور، به‌ویژه گسل زاگرس و گسل مکران، نقش تعیین‌کننده‌ای در لرزه‌خیزی این مناطق دارد.



شکل ۹- شهرهای در معرض خطر آسیب پذیری ناشی از زمین لرزه بر اساس تحلیل لکه های داغ و محدوده های حریم خطر

Fig.9. Cities at Risk of Earthquake Vulnerability Based on Hotspot Analysis and Hazard Buffer

شهرهای متعددی از جمله در استان های فارس، کرمان، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان، ایلام، بوشهر و هرمزگان در این محدوده ها شناسایی شده اند که در طی سال های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ بیشترین زلزله ها را با بزرگی ۴ و بیشتر تجربه کرده اند. همچنین، استان های شمالی از جمله مازندران، گلستان و گیلان به دلیل تراکم جمعیت بالا و توسعه شهری گسترده، در معرض خطر جدی زمین لرزه قرار دارند. این تحلیل، علاوه بر تأیید شهرستان های پرخطر، تأکید اصلی خود را بر شهرهایی که مستقیماً در محدوده های خطر زلزله واقع شده اند، معطوف کرده است.

از منظر برنامه ریزی شهری و مدیریت بحران، این اطلاعات می تواند به تدوین سیاست های مؤثرتر در جهت مقاوم سازی زیرساخت ها، بهینه سازی مدیریت بحران، و تخصیص منابع برای کاهش آسیب پذیری کمک کند. توسعه سیستم های هشدار سریع، برنامه ریزی شهری مبتنی بر تحلیل های لرزه ای، و اجرای قوانین سخت گیرانه تر در ساخت و ساز از جمله اقداماتی هستند که می توانند به کاهش میزان تلفات جانی و مالی کمک کنند. در نهایت، این نقشه ها تصویری دقیق از پراکندگی خطر زلزله در ایران ارائه می دهند و می توانند به عنوان ابزاری کلیدی در سیاست گذاری های مرتبط با کاهش خطرات لرزه ای و توسعه پایدار مورد استفاده قرار گیرند.

(ز) بررسی اولویت بندی شهرهای در معرض خطر زلزله

تحلیل داده های شهری و زلزله (جدول ۱)، نشان می دهد که شهرهایی مانند وحدتیه، خورموج، راور، زرنده و کوه بنان در فاصله ۵ کیلومتری از کانون های زلزله قرار دارند و بالاترین میزان خطر را تجربه می کنند. همچنین، شهرهایی مانند نورآباد، قائمیه، کازرون، و خواجه در فاصله ۱۰ کیلومتری قرار گرفته و در دسته خطر بالا محسوب می شوند. علاوه بر این، شهرهایی مانند جیرفت، فهرج، و شهرکرد در فاصله ۲۵ تا ۴۰ کیلومتری از کانون زلزله قرار داشته و همچنان آسیب پذیر هستند. این اولویت بندی نشان می دهد که بخش عمده ای از شهرهای پرخطر در استان های فارس، کرمان، بوشهر، و هرمزگان متمرکز شده اند که به دلیل نزدیکی به گسل های فعال زاگرس و مکران، احتمال وقوع زلزله های شدید در آن ها بالا است.

علاوه بر این، تحلیل داده‌های زلزله با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و تحلیل خوشه‌بندی فضایی تأیید می‌کند که شهرها با فاصله کمتر از ۱۴ کیلومتر از کانون‌های زلزله، بیشترین ریسک خسارت سازه‌ای و جانی را دارند. این نتایج اهمیت اجرای سیاست‌های مقاوم‌سازی زیرساختی، بهینه‌سازی مدیریت بحران، توسعه سیستم‌های هشدار سریع، و سخت‌گیری در قوانین ساخت‌وساز را نشان می‌دهد. در نهایت، نقشه‌ها و تحلیل‌های ارائه‌شده، تصویری دقیق از پراکندگی خطر زلزله در ایران ارائه می‌دهند که می‌توانند در سیاست‌گذاری‌های مرتبط با کاهش خطرات لرزه‌ای و توسعه پایدار شهری مورد استفاده قرار گیرند.

بحث

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل فضایی- زمانی زلزله‌های ایران در بازه زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ شمسی و شناسایی مناطق پرخطر از نظر توزیع مکانی و شدت لرزه‌ها بود. برای این منظور، از روش‌های تحلیل فضایی شامل تخمین تراکم کرنل، تحلیل لکه‌های داغ Getis-Ord Gi* و خوشه‌بندی فضایی Anselin's Local Moran's I استفاده شد. یافته‌های پژوهش نشان داد که بیشترین تراکم زلزله‌ها در مناطق غربی، جنوب غربی و جنوب شرقی ایران، به‌ویژه در امتداد گسل‌های زاگرس، مکران و البرز مشاهده می‌شود. نتایج تحلیل خطرپذیری شهری نیز نشان داد که ۵۹ درصد از شهرهای ایران در فاصله کمتر از ۱۴ کیلومتری از کانون‌های زلزله قرار دارند و شهرهایی مانند زرنند، خورموج و کازرون در فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتری از مراکز لرزه‌خیز واقع شده‌اند، که این امر احتمال خسارات شدید را افزایش می‌دهد.

تحلیل تراکم کرنل نشان داد که بالاترین تراکم زمین‌لرزه‌ها در استان‌های فارس، کرمان، بوشهر و کهگیلویه و بویراحمد مشاهده شده است. این نتایج با پژوهش گنجائیان (Ganjaeian, 2023) که تأکید کرده بود فعالیت لرزه‌ای در این نواحی به دلیل حضور گسل‌های فعال بالا است، همخوانی دارد. همچنین، یافته‌های این پژوهش با نتایج بهره‌ور و همکاران (Bahrehvar et al., 2023) تطابق دارد که نشان داده‌اند شهرهای با رشد سریع شهری و تراکم بالای جمعیت، در معرض خطر بیشتری قرار دارند. علاوه بر این، پژوهش لجم اورک و پیری (Lajmorak & Piri, 2023) نیز به نقش ویژگی‌های توپوگرافی و تکتونیکی در تشدید فعالیت‌های لرزه‌ای در ایران اشاره کرده است، که یافته‌های این مطالعه نیز اهمیت این عوامل را در توزیع زلزله‌ها تأیید می‌کند.

نتایج تحلیل لکه‌های داغ نشان داد که نواحی جنوب و جنوب شرقی ایران، به‌ویژه استان‌های هرمزگان، کرمان و سیستان و بلوچستان، بیشترین سطح خوشه‌بندی لرزه‌ای را دارند. این یافته‌ها با پژوهش‌هایی که به نقش گسل مکران و دیگر ساختارهای فعال جنوب ایران اشاره کرده‌اند، همخوانی دارد. از سوی دیگر، برخی از یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین مغایرت‌هایی دارد. برای مثال، گنجائیان (Ganjaeian, 2024) تأکید کرده بود که بیشترین تراکم زلزله‌ها در شمال شرق ایران مشاهده می‌شود، درحالی‌که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که این ناحیه، فعالیت لرزه‌ای متوسطی دارد. این تفاوت ممکن است ناشی از اختلاف در دوره‌های زمانی داده‌های مورد استفاده یا تفاوت در روش‌های تحلیلی باشد. همچنین، برخی پژوهش‌ها مانند تحقیق راشد و همکاران (Rashed et al., 2007) بیان کرده‌اند که شهرهای مرکزی ایران نسبت به مناطق کوهستانی کمتر تحت تأثیر زلزله قرار دارند، اما این پژوهش نشان داد که برخی شهرهای مرکزی، به‌ویژه آن‌هایی که در نزدیکی گسل‌های فعال قرار دارند، همچنان در معرض خطر بالایی هستند. این اختلاف می‌تواند به بهبود دقت روش‌های تحلیلی جدید، استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری به‌روز و تفاوت در معیارهای ارزیابی آسیب‌پذیری شهری مرتبط باشد.

تحلیل همبستگی فضایی Moran's I نشان داد که بسیاری از شهرهای پرجمعیت کشور در نواحی با الگوی خوشه‌بندی لرزه‌ای معنادار قرار دارند. این موضوع تأیید می‌کند که رابطه مستقیمی بین توسعه شهری و افزایش آسیب‌پذیری لرزه‌ای وجود دارد. با این حال، در برخی مناطق مانند بخش‌هایی از شمال شرق ایران، خوشه‌بندی لرزه‌ای معناداری مشاهده نشد، که می‌تواند به عواملی مانند تغییرات در تنش‌های تکتونیکی، عمق کانون زلزله‌ها یا کیفیت داده‌های ثبت‌شده مرتبط باشد.

جدول ۱- شهرهای ایران در معرض خطر زمین‌لرزه بر اساس فاصله از کانون‌های لرزه‌ای

Table 1 – Iranian Cities at Earthquake Risk Based on Proximity to Seismic Epicenters

ردیف Row	اسم شهر City Name	فاصله از کانون‌ها Distance from Epicenters(Km)	مقدار ریسک‌پذیری Risk Level	ردیف Row	اسم شهر City Name	فاصله از کانون‌ها Distance from Epicenters(Km)	مقدار ریسک‌پذیری Risk Level
1	وحدتیه Vahdatiyeh	5	Very High Risk	21	ورزقان Varzeqan	5	Very High Risk
2	خورموج Khormuj	5	Very High Risk	22	بهاباد Bahabad	5	Very High Risk
3	کوه بنان Kuh Banan	5	Very High Risk	23	خشت Khesht	5	Very High Risk
4	راور Ravar	5	Very High Risk	24	جویم Juyom	5	Very High Risk
5	زرند Zarand	5	Very High Risk	25	لار Lar	5	Very High Risk
6	شلمزار Shalamzar	5	Very High Risk	26	اشکنان Ashkanan	5	Very High Risk
7	گهرو Gahro	5	Very High Risk	27	بنک Bonak	5	Very High Risk
8	ناغان Naghan	5	Very High Risk	28	پیر شهر Pir Shahr	5	Very High Risk
9	خوی Khoy	5	Very High Risk	29	بندر گارک Bandar Gark	5	Very High Risk
10	حاجی آباد Hajiabad	5	Very High Risk	30	انکهرن Ankahara n	5	Very High Risk
11	بندرعباس Bandar Abbas	5	Very High Risk	31	فارغان Farghan	5	Very High Risk
12	دهلران Dehloran	5	Very High Risk	32	شجدک Shojadak	5	Very High Risk
13	دوگنبدان Dogonbada n	5	Very High Risk	33	زیارت‌علی Ziyarat Ali	5	Very High Risk
14	تازه آباد Tazehabad	5	Very High Risk	34	سردشت Sardasht	5	Very High Risk
15	سرپل ذهاب Sarpol-e Zahab	5	Very High Risk	35	امام حسن Emam Hasan	10	Very High Risk
16	سالند Saland	5	Very High Risk	36	بندرگناوه Bandar Genaveh	10	Very High Risk
17	شوشتر Shushtar	5	Very High Risk	37	بندر ریگ Bandar Rig	10	Very High Risk
18	زاغه Zagheh	5	Very High Risk	38	شبانکاره Shabankar eh	10	Very High Risk

19	جوشقان Jowshaqan	5	Very High Risk	39	دالکی Dalki	10	Very High Risk
20	اسدیه Asadieh	5	Very High Risk	40	سعدآباد Saadabad	10	Very High Risk

این یافته‌ها نشان‌دهنده ضرورت اجرای سیاست‌های مقاوم‌سازی شهری، توسعه زیرساخت‌های ایمن و مدیریت بحران مؤثر در مناطق پرخطر است. مشخص شد که حتی شهرهایی که در فاصله ۲۵ تا ۴۰ کیلومتری از کانون زلزله‌های مخرب قرار دارند، همچنان در معرض خطر هستند. این موضوع بر اهمیت پایش لرزه‌ای و برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت بحران تأکید دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند در تدوین استراتژی‌های اولویت‌بندی مناطق پرخطر و تخصیص منابع برای کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله مؤثر باشد.

با وجود یافته‌های ارزشمند، این پژوهش با برخی محدودیت‌ها نیز همراه بوده است. از جمله، عدم دسترسی به داده‌های دقیق درباره ویژگی‌های سازه‌ای و کیفیت ساخت‌وساز شهری موجب شد ارزیابی مستقیم‌تری از میزان تاب‌آوری کالبدی مناطق شهری انجام نگردد. همچنین، تمرکز تحقیق بر زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۴ و بالاتر، باعث شد زلزله‌های کوچک‌تر که می‌توانند نقش مهمی در انباشت تنش‌ها و تحریک گسل‌ها داشته باشند، مورد توجه قرار نگیرند. به علاوه، تأثیر شرایط ژئوتکنیکی، نوع خاک و لایه‌های زمین‌شناختی در شدت مخاطره به صورت جداگانه بررسی نشد.

با این حال، پژوهش حاضر با تحلیل فضایی و زمانی بیش از ۱۰ هزار زمین‌لرزه در بازه‌ای بلندمدت و در سطح ملی، سهم معناداری در ارتقای ادبیات علمی مربوط به مخاطرات لرزه‌ای ایران دارد. استفاده از رویکردهای تلفیقی در سامانه GIS و بهره‌گیری از مدل‌های آماری، امکان ترسیم الگوهای دقیق‌تری از خوشه‌های پرخطر را فراهم کرده که می‌تواند در تدوین سیاست‌های مکان‌محور مقاوم‌سازی، اولویت‌بندی شهری و پایش خطر مؤثر واقع شود. از این جهت، پژوهش حاضر نه تنها به شناسایی دقیق‌تر نواحی پرخطر پرداخته بلکه ابزارهایی برای برنامه‌ریزی بهتر در سطح کلان و محلی پیشنهاد می‌دهد.

پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با گسترش داده‌های مورد استفاده به حوزه‌های ژئوتکنیکی، سازه‌ای و اجتماعی، به تحلیل چندبعدی آسیب‌پذیری لرزه‌ای بپردازند. همچنین ترکیب داده‌های تاریخی زلزله با روش‌های یادگیری ماشین و مدل‌های پیش‌بینی مکانی-زمانی می‌تواند زمینه را برای طراحی سیستم‌های هشدار سریع و مدیریت هوشمند بحران فراهم سازد. استفاده از سناریوهای شبیه‌سازی و سنجش ظرفیت پاسخ‌گویی شهری، از دیگر مسیرهای پیشنهادی برای ادامه این مسیر پژوهشی است که می‌تواند به تقویت تاب‌آوری ساختاری و نهادی شهرهای ایران بپردازد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، الگوی فضایی و زمانی زمین‌لرزه‌های ایران طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ با استفاده از ابزارهای تحلیل مکانی بررسی شد. نتایج نشان داد که در این بازه زمانی، بیش از ۱۰ هزار زمین‌لرزه با بزرگی ۴ ریشتر و بالاتر ثبت شده که ۲۵ مورد از آن‌ها دارای بزرگای بیش از ۶.۵ ریشتر بوده‌اند. چگالی رخدادهای لرزه‌ای عمدتاً در مناطق غربی و جنوبی کشور از جمله استان‌های هرمزگان، کرمان، فارس و کهگیلویه و بویراحمد متمرکز است.

تحلیل لکه‌های داغ نشان داد که حدود ۵۹ درصد از شهرهای کشور در فاصله کمتر از ۱۴ کیلومتری از کانون‌های زلزله قرار دارند. شهرهایی نظیر زرنده، خورموج، راور و کازرون در نزدیکی کانون‌های فعال قرار گرفته‌اند و شهرهایی چون جیرفت، فهرج و شهرکرد نیز علی‌رغم فاصله بیشتر، همچنان در معرض خطر بالا هستند. همچنین بیش از ۷۰ درصد از زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده دارای عمق کمتر از ۱۵ کیلومتر بوده‌اند که احتمال تخریب شدید مناطق شهری را افزایش می‌دهد. در مقابل، برخی زلزله‌های عمیق‌تر در جنوب کشور اگرچه خسارات سطحی کمتری داشته‌اند، اما بالقوه می‌توانند خطر سونامی را به همراه داشته باشند.

یافته‌های پژوهش، ضرورت بازنگری در سیاست‌های مدیریت بحران را برجسته می‌سازد. مقاوم‌سازی بافت شهری، نظارت بر ساخت‌وساز، توسعه زیرساخت‌های ایمن، گسترش سامانه‌های هشدار سریع، و پایش مداوم گسل‌ها از جمله اقدامات ضروری هستند. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند GIS و هوش مصنوعی نیز می‌تواند در پیش‌بینی خطر و تحلیل سناریوهای آینده نقش کلیدی داشته باشد. در نهایت، بازنگری در برنامه‌ریزی شهری و ارتقاء تاب‌آوری اجتماعی از طریق آموزش عمومی و برنامه‌های پیشگیری، می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری شهرهای ایران در برابر زلزله کمک شایانی کند.

حامی مالی

هزینه‌های مطالعه حاضر توسط نویسندگان مقاله تأمین شد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

- Afifi, M. E. (2020). Earthquake spatial statistics analysis and its adaptation to faults and quaternary loess sediments using GIS (Case of study Khuzestan province). *Regional Planning*, 10(38), 179-190. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/Journal/jzpm/Article/1157929>
- Alden, A. (2017). How many strong earthquakes occur annually? ThoughtCo. <https://www.thoughtco.com/geologic-maps-of-the-united-states-4122863?>
- Azadeh, S. R., Taghvaei, M. (2017). Spatial analysis of vulnerability in urban and rural settlements against earthquake hazard Case Study: Guilan Province. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 4(3), 71-84. [In Persian] <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2750-fa.html>
- Bahrehvar, H., Asgharizamani, A., & Feizizadeh, B. (2023). Comparative comparison and leveling of physical-environmental resilience of urban fabric in ten districts of Tabriz city in against earthquake using spatial analysis-decision-making combined models. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 2(5), 77-55. [In Persian] https://rsgi.tabrizu.ac.ir/article_16444.html
- Ganjaeian, H. (2023). Analysis of the tectonic status of the northwestern Zagros anticlines and its relationship with seismic centers. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(4), 275-290. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoe.2022.75370.1182>
- Ganjaeian, H. (2024). Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran During the years 1907 to 2023. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 222-243. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoe.2024.87246.1470>
- Gulati, B. (2006). Earthquake risk assessment of buildings: applicability of HAZUS in Dehradun, India. *Enschede, ITC*, 109. <https://purl.utwente.nl/essays/101997>
- Hadiani, Z., Hosseini, S. A., & Biabani, F. (2021). Identification and Evaluation of Physical Development Opportunities of Earthquake of Hajiabad City, Zirkuh Township. *Urban Structure and Function Studies*, 8(26), 191-213. [In Persian] <https://doi.org/10.22080/usfs.2021.3124>
- Hashemi, S. N. (2022). Statistical Modeling of the Migrating Pattern of the Occurrence of Successive Earthquakes in the Zagros Region. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 8(4), 93-103. [In Persian] <https://doi.org/10.48303/bese.2021.243812>
- Heidarifar, M. R., & Mahmoudi, A. (2021). Analysis of Javanrud Urban Land Use Vulnerability to Earthquake, Using Network Analysis (ANP) and Geographic Information System (GIS). *Human Geography Research*, 53(1), 119-137. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jhgr.2019.279271.1007898>

- Hough, S. E. (2021). Contributed reports of widely felt earthquakes in California, United States: If they felt it, did they report it?. *Frontiers in Earth Science*, 9, 770445. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.770445>
- Lajmorak, M., & Piri, Z. (2023). Landslide hazard zoning using Hierarchical Analysis Process (AHP) Model and GIS technology (Case study: Baghmalek County). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(3), 193-215. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.77009.1239>
- Liu, Y., Zheng, J., Lu, H., & Li, X. (2022). Vulnerability assessment and spatio-temporal dynamics analysis of agricultural flood in China. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 902968. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.902968>
- Maleki, S., Amanpour, S., Shojaeeyan, A., & Razavii, M. (2020). Surveying and measuring the physical and social resilience to earthquakes (Case study of Izeh City). *Urban Structure and Function Studies*, 7(22), 81-111. [In Persian] <https://doi.org/10.22080/usfs.2019.15917.1743>
- Najafi Kani, A. (2021). Analyzing the Resilience of Rural Settlements against Earthquakes: A Case Study of Mountainous and Plain Villages of Amol County in Iran. *Village and Development*, 24(3), 172-196. [In Persian] <https://doi.org/10.30490/rvt.2020.342639.1212>
- Nazari Bayatiani, F., Jafar Beglou, M., Mohammad Khan, S., & Maghsoudi, M. (2022). Landslide Hazard Zonation in Kolor Region Using Bayes' Theorem-ANP Hybrid Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(2), 1-21. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.69988.1048>
- O'Keefe, P., Westgate, K., & Wisner, B. (1976). Taking the Naturalness Out of Natural Disasters. *Nature*, 260(5552), 566-567. <https://doi.org/10.1038/260566a0>
- Oulahen, G., Mortsch, L., O'Connell, E., Harford, D., & Rutledge, A. (2019). Local practitioners' use of vulnerability and resilience concepts in adaptation to flood hazards. *Climatic Change*, 153(1), 41-58. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02386-w>
- Parizi, S. M., Taleai, M., & Sharifi, A. (2022). A GIS-Based Multi-Criteria Analysis Framework to Evaluate Urban Physical Resilience against Earthquakes. *Sustainability*, 14(9), 5034. <https://doi.org/10.3390/su14095034>
- Pashapour, H., Ghorbani, R., Farhadi, E., & Daroudinia, A. (2019). Zoning the Hazards of Earthquake Using Geographical Information System (A Case Study of Tabriz Metropolis). *Environmental Based Territorial Planning (Amayesh)*, 12(45), 49-70. [In Persian] https://journals.iau.ir/article_668103.html
- Paton, D., & Johnston, D. (2017). *Disaster resilience: an integrated approach*. Charles C Thomas Publisher. https://www.ccthomas.com/details.cfm?P_ISBN13=9780398091699
- Rashed, T., Weeks, J., Couclelis, H., & Herold, M. (2007). An integrative GIS and remote sensing model for place-based. *Integration of GIS and Remote Sensing*, 199. <https://B2n.ir/p60774>
- Rusydi, H., Effendi, R., & Rahmawati, R. (2017). Vulnerability zoning of earthquake disaster of Palu. *International Journal of Science and Applied Science: Conference Series*, 1(2), 137-143. <https://doi.org/10.20961/ijsascs.v1i2.5138>
- Smith, K., Fearnley, C. J., Dixon, D., Bird, D. K., & Kelman, I. (2023). *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster*. London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781351261647>
- Taroni, M., Petrillo, G., & Lippiello, E. (2025). Earthquake Size Distributions of Strong Worldwide Seismicity Are Similar for Background and Triggered Events. *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220240481>
- Tian, Q., Zhang, S., Yu, H., & Cao, G. (2019). Exploring the factors influencing business model innovation using grounded theory: The case of a Chinese high-end equipment manufacturer. *Sustainability*, 11(5), 1455. <https://doi.org/10.3390/su11051455>
- Xofia, M., Ferreira, T. M., Domingues, J. C., Santos, P. P., Pereira, S., Oliveira, S. C., ... & Lourenço, P. B. (2024). On the seismic vulnerability assessment of urban areas using Census data: The Lisbon Metropolitan Area as a

pilot study area. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(1), 242–265.
<https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2197078>

Zheng, B., Bi, G., Liu, H., & Lowry, P. B. (2020). Corporate crisis management on social media: A morality violations perspective. *Journal of Heliyon*, 6(7), 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04435>